

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

**Degradace materiálu komponent
vodních děl a jejich opravy**

Degradation of Materials of Components
of Water Works and Their Repairs

Student:	Marek Hutař
Osobní číslo	HUT0018
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Hutař**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Degradace materiálu komponent vodních děl a jejich opravy**
Degradation of Materials of Components of Water Works and Their Repairs
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii materiálů a jejich použití pro komponenty vodních děl.
2. Návrh odběru zkušebních vzorků a zkoušení částí česlí po dlouhodobém provozu.
3. Zkoušení mechanických vlastností a metalografické hodnocení.
4. Vyhodnocení vlivu změny mechanických vlastností a mikrostruktury.
5. Návrh možných oprav česlí.
6. Diskuze dosažených výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986, 265 s.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.
KUČERA, J. *Teorie svařování*, VŠB Ostrava 1991.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019
Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísečné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Otravě dne 18. května 2020

Jméno a příjmení autora: Marek Hutař


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020


.....
Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HUTAŘ, M. *Degradace materiálu komponent vodních děl a jejich opravy: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 48 s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Bakalářská práce se zabývá možností opravy původních ocelových komponent vodních děl. Pro opravy původních komponent jsou navrženy varianty pro využití materiálu stejných vlastností. V rámci opravy spodních výpustí na vodním díle Jesenice bylo možné ve spolupráci s Povodím Ohře získat vzorky materiálu původních komponent. Tento získaný materiál byl použitý pro upřesnění jakosti materiálu a jeho fyzikálních vlastností při dlouhodobém vystavení zvýšenému okolnímu tlaku v mokřém prostředí.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HUTAŘ, M. *Degradation of Materials of Components of Water Works and Their Repairs: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 48 p. Thesis head: Krejčí, L.

The bachelor's thesis deals with the possibility of repairing the original steel components of water works. For repairs of the original components, variants are proposed for the use of material with the same properties. As part of the repair of the lower outlets on the Jesenice waterworks, it was possible to obtain samples of the material of the original components in cooperation with the Ohře River Basin. This obtained material was used to specify the quality of the material and its physical properties during long-term exposure to elevated ambient pressure in a wet environment.

OBSAH

ÚVOD	13
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	14
1.1 Vodní dílo Jesenice	14
1.2 Účel vodního díla	14
1.3 Skladba hráze	15
1.4 Sběr dat na VD	17
1.5 Česle	18
1.6 Původní stav česlí na Jesenici	19
1.7 Nízkouhlíkové oceli použitelné na vodních dílech	20
1.7.1 Ocel konstrukční běžná S 235 / DIN 1,0035 (11 343)	20
1.7.2 Ocel na bezešvé trubky SPT360 / DIN 1,0038 (11 353)	20
1.7.3 Ocel konstrukční běžná S 255 / DIN 1,0036 (11 373)	21
1.7.4 Ocel konstrukční běžná S 245 JR / DIN 1,0038 (11 375)	21
1.7.5 Ocel na mostní konstrukce S 245 / DIN 1,0116 (11 378)	21
1.7.6 Ocel na strojní součásti a hřídele E 295 (11 500)	21
1.7.7 Nerezová ocel 1.4301 (X5CrNi 18-10)	22
1.8 Vliv prvků na svařitelnost ocelí	22
1.8.1 Uhlík	22
1.8.2 Vodík	22
1.8.3 Mangan	23
1.8.4 Křemík	23
1.8.5 Chrom	23
1.8.6 Nikl	23
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	24
2.1 Odběr části česlí pro experiment	24
2.2 Příprava a označení zkušebních vzorků	25
2.3 Vizuální kontrola	26
2.4 Korozní oslabení ZM	26
2.4.1 Stanovení korozního oslabení ZM	27
2.4.2 Výpočet celkového úbytku ZM	28
2.5 Chemické složení vzorků oceli	28
2.6 Mechanické vlastnosti materiálů	30
2.6.1 Zkouška tahem	30
2.6.2 Zkouška rázem v ohybu	31
2.7 Stanovení hustoty oceli	32
2.8 Metalografické hodnocení	33

2.8.1	<i>Mikrostruktura původního základního materiálu</i>	33
2.9	Určení jakosti základního materiálu.....	34
2.10	Metalografické šetření u návaru.....	35
2.11	Zkouška tvrdosti návaru.....	39
2.12	Metalografické hodnocení návaru.....	41
2.13	Mikrostruktura svařovaného základního materiálu.....	41
2.14	Metalografické šetření koutového svaru	42
2.15	Metalografické hodnocení koutového svaru	46
3	VYHODNOCENÍ Vlivu Změny Mechanických Vlastností a Mikrostruktury	47

Seznam použitých značek a symbolů

ρ	hustota	[kg/m ³]
A_5	tažnost	[%]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
KV	nárazová práce	[J]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p\ 0,2}$	mez kluzu	[MPa]
V	objem	[m ³]
Z	zúžení	[%]
m	hmotnost	[kg]
m_0	počáteční hmotnost	[kg]
m_1	hmotnost v oslabení	[kg]
m_u	hmotnost úbytku oceli	[%]
m_{kor}	hmotnost koroze	[kg]
pH	kyselost / zásaditost vody	[-]
DIN	deutsche industrie norm	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
VD	vodní dílo	[-]
SV	svarový kov	[-]
ZM	základní materiál	[-]

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní údaje přehrady Jesenice [1,3,4]	15
Tabulka 2. - Označení vzorků pro experiment	25
Tabulka 3 - Původní objem a hmotnost vzorku [7]	27
Tabulka 4 - Stávající objem a hmotnost vzorku	27
Tabulka 5 - Chemické složení vzorku 1/2	28
Tabulka 6 - Chemické složení vzorku 2/2	29
Tabulka 7 - Chemické složení vzorku 1/3	29
Tabulka 8 - Zkouška tahem česlice 1	30
Tabulka 9 - Zkouška tahem česlice 2	30
Tabulka 10 - Zkouška rázem v ohybu u česlice 1	31
Tabulka 11 - Zkouška rázem v ohybu u česlice 2	31
Tabulka 12 - Rozměry, hmotnost a hustota vzorku 1/3	32
Tabulka 13 - Druhy ocelí a jejich značení	35
Tabulka 14 - Parametry svařovacího zdroje	36
Tabulka 15 - Chemické složení a parametry přídatného materiálu [20]	36
Tabulka 16 - Parametry svařovacího zdroje	36
Tabulka 17 - Tvrdosti v jednotlivých oblastech návaru vzorku 2/3 a	40

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Situační plán [2]	14
Obrázek 2 - Řez zemním tělesem hráze [1].....	15
Obrázek 3 - Řez nátokovým objektem [1].....	16
Obrázek 4 - Popis jednotlivých komponent česlí [5].....	18
Obrázek 5 - Osový řez [7]	20
Obrázek 6 - Část původního česlového pole	24
Obrázek 7 - Korozní nárůst na svorníku česlí	26
Obrázek 8 - Vážení vzorku	27
Obrázek 9 - Korozní oslabení oceli	27
Obrázek 10 - Vybroušený vzorek 1/3 (ZM)	32
Obrázek 11 - Mikrostruktura základního materiálu	33
Obrázek 12 - Mikrostruktura základního materiálu – detail	33
Obrázek 13 - Základní materiál	34
Obrázek 14 - Kavita se rží	34
Obrázek 15 - Makrostruktura vzorku 1/3 základního materiálu.....	37
Obrázek 16 - Návar č.1	37
Obrázek 17 - Návar č2	38
Obrázek 18 - Mikrostruktura svarového kovu	38
Obrázek 19 - Mikrostruktura svarového kovu	39
Obrázek 20 - Hranice ztavení mezi svarovým kovem a ZM	39
Obrázek 21 - Oblast vtisku	40
Obrázek 22 - Zkušební koutový svar	42
Obrázek 23 - Základní materiál podložky a stojiny	42
Obrázek 24 - Makrostruktura koutových svarů	43
Obrázek 25 - Svarový kov perliticko-bainitické struktury	44
Obrázek 26 - Hranice ztavení	44
Obrázek 27 - Struktura dolní housenky.....	45
Obrázek 28 - Detail struktury	45

Seznam grafů

Graf 1 - Průměrné průtoky vody [3]	17
Graf 2 - Hodnota pH a obsah O ₂ [3]	17
Graf 3 - Zkouška tvrdosti.....	40

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je posouzení vhodnosti použitých materiálů a technologií při opravě komponent pod vodní hladinou. Jde o prostředí trvale mokré s vyšším tlakem, bez možnosti přemístění dané součástky do suchých míst s normálním tlakem. Tato tematika je v současné literatuře velmi málo prezentována, přestože je klíčová pro bezpečnost a funkčnost oprav a údržbu komponent vodních děl.

Pro tuto práci bylo vybráno vodní dílo Jesenice, kde v roce 2018 proběhla oprava česlí na dolních výpustích. V teoretické části se práce zabývá současným stavem tohoto vodního díla, použitelnými oceli a obecným vlivem prvků na svařitelnost ocelí.

V experimentální části byly použity původní česlové komponenty vodního díla Jesenice. Byly provedeny chemické, mechanické zkoušky materiálu komponent a následně byl proveden návar na původní materiál a proběhlo metalografické šetření a zkoušky tvrdosti.

Na základě provedených zkoušek byla zjišťována kvalita opravy svařováním pod vodní hladinou obalovanou elektrodou a možnost provedení takových opravných prací na dalších vodních dílech realizovaných přibližně ve stejné době.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 Vodní dílo Jesenice

Přehrada Jesenice na obrázku 1 se nachází 5 km východním směrem od města Cheb na řece Odřavě, která tvoří pravostranný přítok řeky Ohře. Složité stavební poměry, včetně nepříznivého chemického složení vody v podloží, byly pro stavbu přehrady velkou komplikací. Naproti tomu dobrá morfologie zde nakonec umožnila výstavbu druhé největší nádrže v povodí Ohře.

Hydrologický průzkum a projektovou dokumentaci provedl Hydroprojekt Praha, který společně s Vodními stavbami, Sezimovo Ústí započaly výstavbu v roce 1957 a ukončili v listopadu roku 1961. Uvedení díla do provozu bylo v roce 1960 [1].



Obrázek 1 - Situační plán [2]

1.2 Účel vodního díla

Hlavní účel vodního díla Jesenice v součinnosti s vodním dílem Skalka je kompenzační nadlepšení průtoků v řece Ohři pro průmyslové podniky a tepelné elektrárny včetně zajištění minimálních průtoků v profilu řeky Ohře na úseku Karlovy Vary až Kadaň.

Vodní dílo částečně chrání území pod hrází při povodních a vyrábí elektrickou energii na malé vodní elektrárně o výkonu 300 kW.

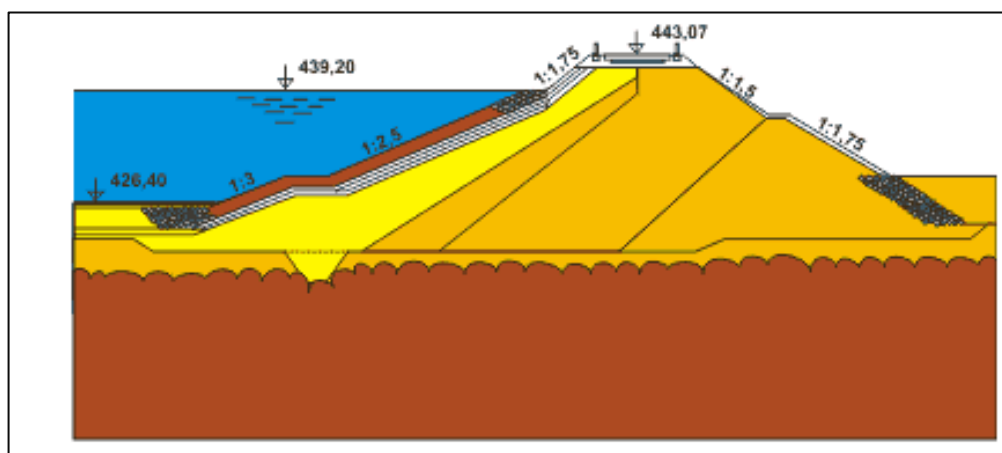
V neposlední řadě je využívána jako rekreační místo s provozováním vodních sportů. Základní technické údaje o díle jsou vepsány do tabulky 1 na straně 15 [1, 4].

Tabulka 1 - Základní údaje přehrady Jesenice [1,4]

Plocha povodí	411,04 km²
Průměrný roční úhrn srážek	675 mm
Průměrný dlouhodobý roční průtok	3570 l/s
Stoletý průtok /Q100/	139 m³/s
Minimální průtok MQ	560 l/s
Neškodný průtok pod vodním dílem	18m³/s
Kóta dna nádrže	422,60 m.n.m
Výška hladiny letního zásobního prostoru	439,20 m.n.m.
Výška hladiny zimního zásobního prostoru	437,60 m.n.m.
Maximální hladina	440,70 m.n.m.
Celkový zásobní prostor	60.150 mil. m³
Výška hráze nad terénem	20 m
Délka hráze	753 m

1.3 Skladba hráze

Sypané zemní těleso je tvořené nepropustnou těsnicí vrstvou na návodní straně z jílovitých hlín. Stabilizační část tělesa hráze tvoří směs písků a hlinitých šteků. Pata vzdušného líce je opatřena drénem. Pro lepší těsnost hráze je na návodní straně předsunutý těsnicí jílový koberec na celou šíři hráze do vzdálenosti 100 m od paty. Koberec navazuje na těsnicí jádro hráze a eliminuje průsak na bezpečnou úroveň (viz obr. 2) [1].



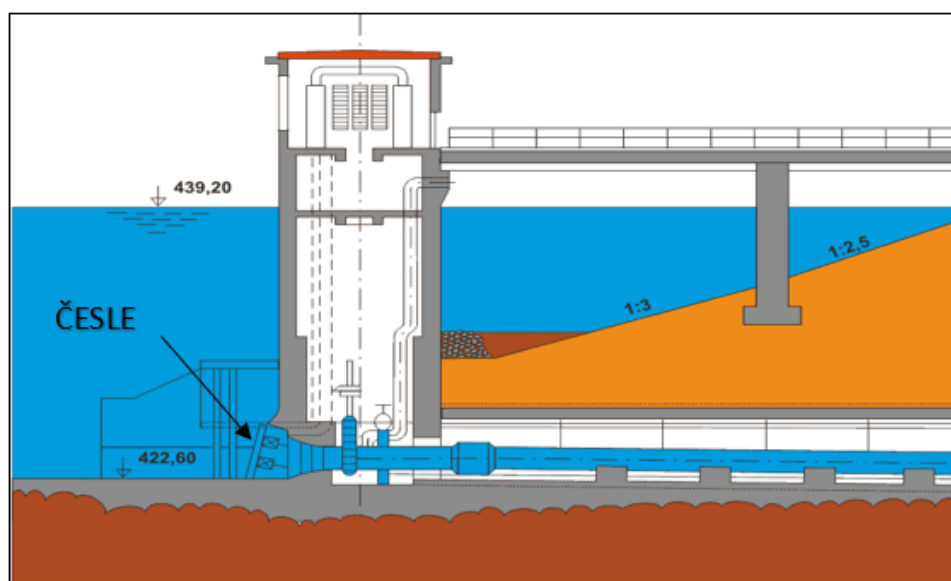
Obrázek 2 - Řez zemním tělesem hráze [1]

Vtokový odběrný věžový objekt na obrázku 3 umístěný v nádrži před hrází je s výškou 27 m a vnějším průměrem 8 m propojen s korunou hráze ocelovou lávkou podepřenou jedním pilířem.

Přes těleso hráze vede na vzdušnou stranu betonová štola o šířce 5,6 m a výšce 4,1 m, ve které je uloženo potrubí spodních výpustí o průměru 1400 mm, na které je napojeno odběrné potrubí pro celkem pět turbín. Toto potrubí spodních výpustí je u paty věžového objektu chráněno česlemi proti naplaveninám [1, 4].

V roce 2018 byla provedena výměna původních česlí v místě nátoku z roku 1959 (viz obr. 3), které pro své korozní oslabení dle výpočtu nebyly schopné dále zajišťovat ochrannou funkci turbíny před případnými většími tělesy. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke kompletní výměně česlí za použití potápěčské techniky [7].

Na základě této výměny byly získány vzorky původního materiálu česlí a jejich podpory, které byly kompletně vyměněny za nerezové třídy 1.4301 (X5CrNi 18-10).

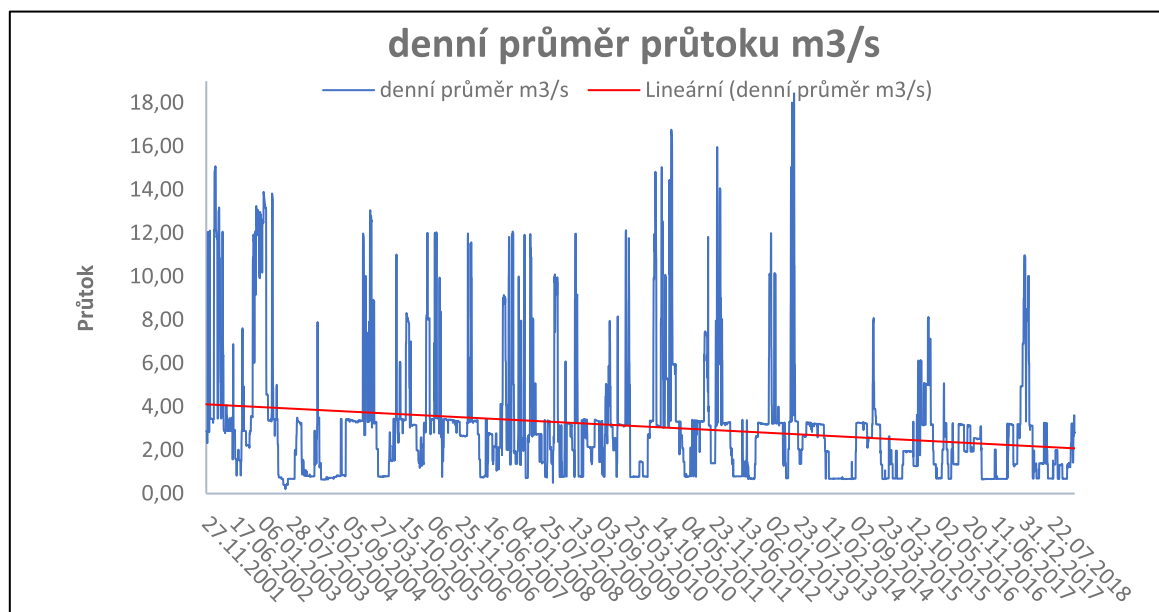


Obrázek 3 - Řez nátokovým objektem [1]

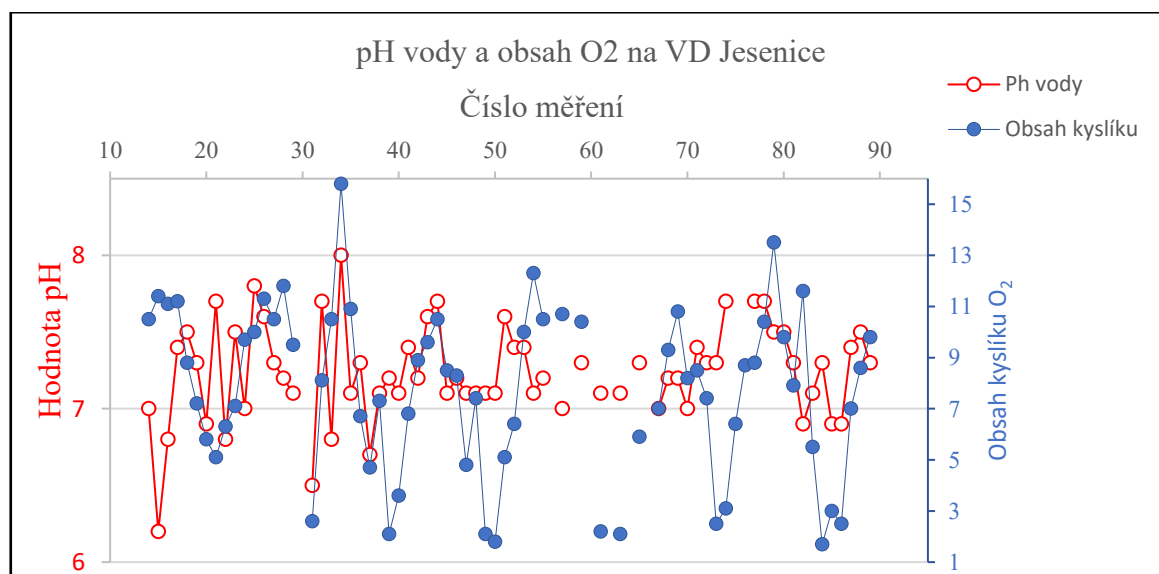
1.4 Sběr dat na VD

Korozní oslabení je úzce spojené s podmínkami prostředí, ve kterém se komponenty nacházejí. Vzhledem k monitoringu kvality vody na vodním díle jsou dostupná data faktorů podílejících se na korozním oslabení.

Mimo monitoring průtoků vody zobrazené v grafu 1 se na VD sledují i hodnoty chloridů, síranů, fosforečnanů, dusitanů, teploty vzduchu i vody, nasycení kyslíkem a pH v terénu viz graf 2.



Graf 1 - Průměrné průtoky vody [3]



Graf 2 - Hodnota pH a obsah O₂ [3]

1.5 Česle

Na obr. 4 jsou instalované česle sloužící k zachycení nečistot plovoucích či sunutých v korytech řek či v přehradních nádržích.

Dříve byly vyráběny z běžně dostupných konstrukčních ocelí, nyní jsou stále častěji z nerezového materiálu. Jsou nejčastější ochranou turbín a vtoků do vodárenských objektů.

Česle se skládají z česlic (pruty ploché oceli nebo kulatiny), svorníků a prvků zajišťujících předepsané průliny (mezery) mezi jednotlivými pruty, kterými proudí kapalina.



Obrázek 4 - Popis jednotlivých komponent česlí [5]

Hrubé česle s šířkou průlin 80–100 mm se umísťují do míst, kde se předpokládají velké plovoucí předměty jako jsou kmeny a větve stromů. Umístění se navrhuje většinou ve větší vzdálenosti od objektu [5,6].

Střední česle s šířkou průlin 20-30 mm jsou nejrozšířenější a chrání zařízení před plovoucím listím, větvemi a drobným sedimentem sunutým korytem řeky. Pro častější údržbu jsou tyto česle většinou doplněné o čistící stroj. Česle tvoří poslední trvalou překážku v cestě vody k turbíně nebo technologickému zařízení [5,6].

Jemné česle s šířkou průlin do 10 mm se používají na ochranu čerpadel proti jemným pevným částem, které mohou mechanicky poškodit oběžná kola s lopatkami.

Každé z česlí představuje překážku protékající kapalině. Proudící kapalina musí mezi česlemi zvýšit rychlost proudění a tím zvýšit odpor, který následně vede ke ztrátě spádu. V praxi to znamená, že hladina před česlemi je výš než za česlemi [5,6].

Faktory ovlivňující tento rozdíl jsou hlavně v rychlosti proudění kapaliny, hustoty česlí, šířce průlin, tvaru prutu česlice a v zanesení česlí. Statický výpočet se provádí na plné zanesení.

Projekce a výroba tohoto zařízení se volí tak, aby bylo možné technicky a s minimálními finančními náklady toto zařízení udržovat. Větší česlové pole se skládá z několika samostatných česlí, které jsou v jednotlivých rámech a dají se v případě potřeby vyjmout, nebo opravovat dle potřeby po segmentech.

Svislé česle jsou většinou umístěné ve svislých vodících drážkách doplněné v dolní části o dosedací příčnou drážku, která zvyšuje celkovou tuhost česlí ve směru proudění vody v případě částečného či celkového zanesení.

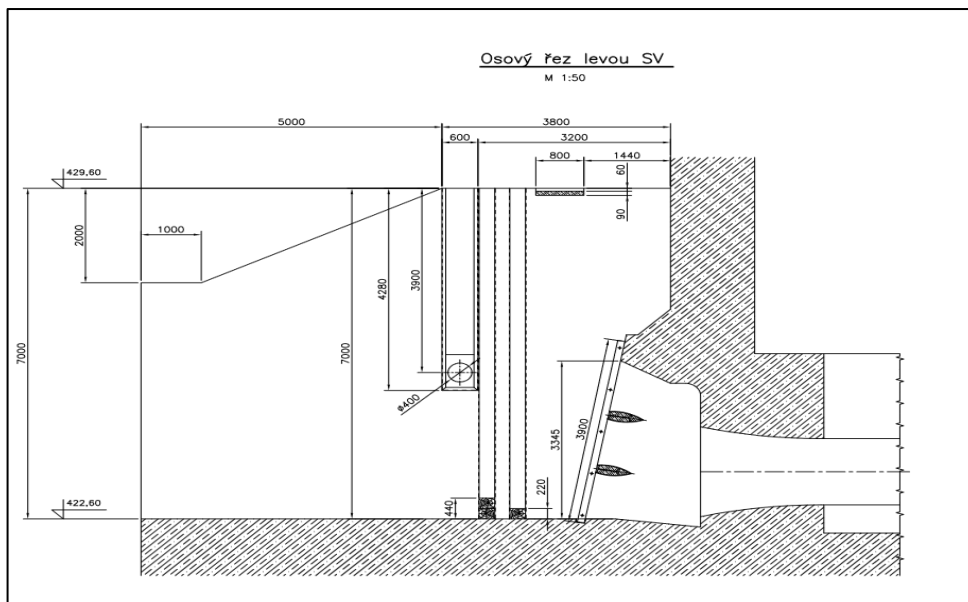
Šikmo položené česle jsou nejčastěji v dolní části usazené do příčné drážky a na několika místech podepřené z vnitřní strany ocelovými profily, které přenáší působící tlak česlí do stěn nátok.

1.6 Původní stav česlí na Jesenici

Dvě spodní výpusti o průměru 1400 mm kryté česlemi jsou mezi sebou oddělené betonovým dělicím pilířem na dva samostatné nátoky, kde je voda usměrněna pro každý nátok zvlášť.

V místě dělicího pilíře je světlá šířka vtoku 3100 mm a světlá výška 3345 mm. Umístění pevných česlí je provedeno pod úhlem 10° od svislé osy a celková délka je 3900 mm. Pruty česlí o rozměru 120 x 12 mm s roztečí 160 mm jsou fixované svorníky v rozteči 950 mm, vždy po pěti kusech. Pata česlí v dolní části je ustavena v drážce z profilu U160, který je zabetonovaný v podlaze pod úhlem 10° od horizontální roviny. Podpůrné nosníky tvaru I o rozteči 1110 mm jsou svými konci zabetonované do bočních stěn samostatného nátoky a kolmo dosedají horní pásnicí na česlové pole. [7].

Pro částečné zabránění turbulentního proudění jsou oba nosníky kryté navařeným ocelovým plechem tvořící částečný tvar křídla patrný z obrázku 5 na str. 20. Česlové pole každého nátoky je celkově sestavené ze čtyř kusů.



Obrázek 5 - Osový řez [7]

1.7 Nízkouhlíkové oceli použitelné na vodních dílech

Na vodních dílech se vzhledem k rozsahu činností setkáváme s velkým množstvím jakostí ocelí. Zde byly vybrány jen některé, se kterými se běžně na vodních dílech pracuje.

Záměrně zde byla vynechána betonářská ocel, která je určena jako výztuž do betonu. Betonářská ocel není vhodná pro komponenty vodních děl.

1.7.1 Ocel konstrukční běžná S 235 / DIN 1,0035 (11 343)

Patří mezi neušlechtilé konstrukční oceli. Vhodná na součásti konstrukcí a strojů menších tlouštěk, tavně svařované namáhané staticky, popř. i mírně dynamicky. Drobné lisované výrobky jako přezky, stavební a nábytkové kování, přídržky, pravítka, žaluzie apod. Různé tvářené a svařované součásti, vložky, třmeny, rozpěrky, závlačky, oka, páky, rukojeti, čepy, svorníky, držáky apod. Trubky pro všeobecné účely. Vhodná ke svařování [8]. [9]

1.7.2 Ocel na bezešvé trubky SPT360 / DIN 1,0038 (11 353)

Ocel určená k výrobě bezešvých trubek, je vhodná na konstrukce staticky namáhaných součástí, potrubí pro vedení ropných produktů, vody, páry, vzduchu, plynu.

Vhodná na spojovací součásti potrubí apod. Svařitelnost zaručená v závislosti na tloušťce polotovaru [8,11]

1.7.3 Ocel konstrukční běžná S 255 / DIN 1,0036 (11 373)

Je neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti, vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů menších tlouštěk, staticky i dynamicky mírně namáhané.

Například vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradídlkové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Dna plochá, klenutá a lemovaná, vysokotlaká, vhodná ke svařování [8,11].

1.7.4 Ocel konstrukční běžná S 245 JR / DIN 1,0038 (11 375)

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti, svařitelná. Strojní a konstrukční součásti středních tlouštěk tavně svařované, namáhané staticky i dynamicky. Součásti vyráběné z plechů, podélně svařovaných dutých profilů, pro tepelná energetická zařízení a tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem do teploty 300°C.

Vhodná na vtokové objekty vodních turbín, spirální skříně vodních turbín, vrata zdymadel, klapky uzávěrů, svařované kulové uzávěry apod. Spojky a podvozky vagónů [8,12].

1.7.5 Ocel na mostní konstrukce S 245 / DIN 1,0116 (11 378)

Ocel nelegovaná, jakostní, jemnozrná, konstrukční. Vhodná pro tenké plechy k lisování. Na svařované mostní a jeřábové konstrukce, strojní součásti, součásti tepelných energetických zařízení a tlakových nádob s omezeným přetlakem a do teploty 300 °C. Svařitelnost zaručená [8, 13].

1.7.6 Ocel na strojní součásti a hřídele E 295 (11 500)

Neušlechtilá konstrukční ocel, obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku, částečně lisovatelná. Ocel vhodná na strojní součásti staticky i dynamicky namáhané, u nichž se nevyžaduje svařitelnost.

Vhodná na hřídele, ozubená kola, strojní součásti soustružené, čepy, kolíky, držáky, podložky, kryty, víka, příruby, pouzdra, kroužky, objímky, základové desky, vodítka strojů, upínací desky pro obráběcí stroje, příložky, šrouby, matice, montážní páky, třmeny, kladky, bubny, hrdla, přípojky apod. Kovové součásti tepelných energetických zařízení. Méně namáhaná nekalená ozubená kola. Svařitelnost obtížná [8].

1.7.7 Nerezová ocel 1.4301 (X5CrNi 18-10)

Chrom niklová, austenitická, nestabilizovaná, použitá na vodním díle. Ocel velmi dobře odolává atmosférické korozi ve venkovním prostředí, pitné vodě, zředěné kyselině dusičné a v některých organických kyselinách. Je-li ocel vystavena po určitou dobu teplotám v rozmezí 500 až 900°C, může dojít ke vzniku náchylnosti k mezikrystalové korozi [14].

1.8 Vliv prvků na svařitelnost ocelí

1.8.1 Uhlík

Je přítomen ve všech ocelích a rozhodujícím způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti a svařitelnost oceli. S rostoucím obsahem uhlíku se mění i hodnoty R_e , R_m , HV a zhoršují se vlastnosti KV, A_5 a Z.

Velice zásadně zvyšuje tvrdost martenzitu vzniklého ve svařech při rychlém ochlazení. Z tohoto důvodu je hodnota uhlíku ve svařitelných ocelích omezena na 0,22 hm %, u které se nepředpokládá vznik studených trhlin. Hodnota martenzitické struktury vytvořené ve svaru nesmí přesáhnout 50 % hm podílu a tvrdost svarového kovu nesmí být větší jak 350 HV 10.

Při větším obsahu uhlíku v oceli je nutné předepsat přehřev, který nelze při svařování pod vodou bez komory s umělou atmosférou aplikovat. Proto jsou oceli s vyšším obsahem uhlíku pro hyperbarické svařování nevhodné [15,16].

1.8.2 Vodík

Vodík je v ocelích vždy nežádoucí. Dostává se do kovu při nedodržení technologie při svařování. Zdroj tohoto plynu je v obalu vlhkých elektrod nebo v nedostatečně vysušeném místě svaru.

Největší rozpustnost vodíku je v železe γ při teplotě 1530 °C, kdy 100 g železa dokáže absorbovat až 28 ml vodíku. Pod vodní hladinou se tomuto problému nelze vyhnout a výrobci elektrod určených k tomuto účelu se snaží zdokonalovat obaly s vysokým vývinem ochranného plynu, které tento jev částečně eliminují [15,16].

1.8.3 Mangan

Mangan patří mezi austenitotvorné prvky. Zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a snižuje tažnost. Proto ve svařitelných ocelích je možné dosáhnout vyšších hodnot meze kluzu a meze pevnosti. Nelegované oceli obsahují 0,3 – 1,7 hm % manganu.

Působí jako dezoxidační prvek a společně s křemíkem se používá k výrobě uklidněných ocelí. Díky své afinitě se síra váže na mangan, který tvoří MnS. Pomocí manganu se snižuje obsah síry jak v oceli, tak i ve svarech [15,16].

1.8.4 Křemík

Křemík patří do skupiny silně feritotvorných prvků. Rozpustnost křemíku v železe α je vysoká a za normálních teplot dosahuje 14 %. Při zvyšování teploty se jeho hmotnostní obsah zvyšuje. V ocelích netvoří karbidy a posouvá začátek rozpadu martenzitu k vyšším teplotám.

Až do obsahu 0,5 % se křemík nepovažuje za legovací prvek, ale jen za dezoxidační přísadu, která je součástí obalu elektrod [15,16].

1.8.5 Chrom

Je karbidotvorný prvek, který výrazně zpevňuje oceli a svarové kovy. Tento prvek je obsažen v elektrodách pro svařování austenitických ocelí. Jeho obsah musí být vyšší než obsah v základním materiálu, který je svařovaný. Od obsahu 11,7 % zajišťuje pasivaci povrchu [15,16].

1.8.6 Nikl

Nikl patří mezi austenitotvorné prvky. Maximální rozpustnost niklu v α -železe je $6,1 \pm 0,5$ % při 475°C. Do základního a svarového kovu je dodáván z důvodu zlepšení plastických vlastností zejména při nízkých teplotách. Zajišťuje dosažení austenitické mikrostruktury kovu [15,16].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Odběr části česlí pro experiment

Pro experiment byly zvoleny ocelové části česlí, které byly součástí VD Jesenice. V roce 2010 až 2014 byl proveden kontrolní průzkum těchto komponent. Na základě vyhodnocení nárůstu koroze na jednotlivých prvcích česlového pole a výpočtu proudění byla potvrzena nedostatečná plocha česlí s nevyhovující vysokou rychlostí proudící vody v oblasti průlin [7].

Protože nebyla nalezena původní dokumentace, nelze přesně dohledat, jaká byla použita jakost oceli. Známa je pouze doba expozice oceli v korozním prostředí, která byla pod vodní hladinou 59 let.

Demontáž původních česlí probíhala v hloubce přibližně 15 metrů a pro tyto ztížené podmínky byla zvolena technologie termického dělení, která je nejrychlejším a nejbezpečnějším řešením.

Původní vyzdvižené česle byly až na zkušební vzorky odvezeny a sešrotovány. Zkušební vzorky z části česlového pole na obr. 6 byly podrobeny analýzám a byly předmětem dalšího zkoumání v rámci této bakalářské práce.



Obrázek 6 - Část původního česlového pole
vlastní zdroj

2.2 Příprava a označení zkušebních vzorků

Česlové pole o rozměrech 1000 x 600 mm bylo demontováno. Jednotlivé části byly očištěny, označeny a částečně naděleny. Vzorky byly odeslány k chemické analýze, ke zkoušce rázem v ohybu a tahové zkoušce. Po návaru pak bylo provedeno metalografické šetření a zkouška tvrdosti.

Rozpis částí a dílů, označení zkušebních těles a způsoby očištění povrchu od rzi, včetně provedených zkoušek je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2. - Označení vzorků pro experiment

Jednotlivé části	Jednotlivé díly	Označení vzorku	Provedený úkon	Zkouška
Česlice 1	Pásovina	1/1	- očištění tlakovou vodou - zhotovení návaru pod vodou	Náhradní vzorek pro další zkoušení
	Pásovina	1/2	- očištění od rzi a nečistot pomocí kyselého roztoku (5% kyselina octová) - měření korozního oslabení - rozbor chemického složení	Stanovení chemického složení, včetně uhlíku
	Pásovina	1/3	- výroba etalonu pro zjištění hustoty	Měření korozního oslabení
	Pásovina	1/4	- mechanické zkoušky	Zkouška tahem a rázem v ohybu
Česlice 2	Pásovina	2/1	- očištění tlakovou vodou - zhotovení návaru pod vodou	Metalografické šetření
	Pásovina	2/2	- očištění od rzi a nečistot pomocí kyselého roztoku - měření korozního oslabení - rozbor chemického složení	Stanovení chemického složení, včetně uhlíku
	Pásovina	2/3	- zkouška mikrotvrdosti	Mikrotvrdost VŠB
	Pásovina	2/4	- mechanické zkoušky	Zkouška tahem a rázem v ohybu

2.3 Vizuální kontrola

Česle a svorníky byly pokryty silnou až 19 mm vrstvou koroze se žluto–oranžovou až žluto–okrovou barvou, která se po uschnutí samovolně odlupovala v silných plátech.

Distanční trubky a svorníkové tyče v prostoru průlin byly zcela srostlé korozí s česlemi dle obr. 7.

Matice na koncích svorníků překrývala silná vrstva rzi, přes kterou ani po očištění nebylo možné určit typ ani velikost matice.



Obrázek 7 - Korozní nárůst na svorníku česlí
vlastní zdroj

2.4 Korozní oslabení ZM

Na základě vzorku č.1 z původních česlí instalovaných na vodním díle Jesenice bylo provedeno stanovení korozního úbytku materiálu.

Měření bylo provedeno pouze pro orientační zjištění korozní rychlosti v daném prostředí. Přibližný výpočet korozního úbytku platí jen pro dané místo a výsledek nelze aplikovat plošně. Měření se uskutečnilo na jednom vzorku bez známé polohy v původním česlovém poli.

Velkou roli na korozním úbytku komponentu hrálo chemické složení vody, hloubka a rychlost proudící kapaliny.

2.4.1 Stanovení korozního oslabení ZM

Tabulka 3 - Původní objem a hmotnost vzorku [7]

Původní hmotnost vzorku bez koroze v roce 1959				
Rozměry vzorku	Délka	Šířka	Výška	Objem
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]
	161	120	12	231840
Hustota vzorku oceli [g/cm ³]	7.865		Hmotnost [g]	1823,422

Hmotnost původního vzorku je odvozena z ideálního rozměru a nepočítá s možnou odchylkou v šířce ocelového pásu dle normy ČSN EN 163-2.

Tabulka 4 - Stávající objem a hmotnost vzorku

Váha vzorku po demontáži v roce 2018				
Rozměry vzorku	Délka	Šířka	Výška	Objem
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]
	161	116	9-11	190968
Hustota vzorku oceli [g/cm ³]	7,865		Hmotnost [g]	1507,7



Obrázek 8 - Vážení vzorku
vlastní zdroj



Obrázek 9 - Korozní oslabení oceli
vlastní zdroj

2.4.2 Výpočet celkového úbytku ZM

$$\frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 = m_u \% \quad \frac{1823,422 - 1507,7}{1823,422} \cdot 100 = 17,3148 \% \quad (1)$$

$$m_0 \cdot m_u = m_{kor} = 1823,422 \cdot 0,173148 = 315,722 \text{ g} \quad (2)$$

Kde m_u je hmotnostní úbytek v procentech

m_{kor} je hmotnostní úbytek v gramech

Dle výpočtu činí úbytek materiálu na česlích **17,3148 %** dle výpočtu (1), což odpovídá váhovému úbytku **315,722 g** dle výpočtu (2) v časovém horizontu 59 let na daném vzorku.

2.5 Chemické složení vzorků oceli

Z důvodu nedohledání stavebního deníku ani jiných dokumentů prokazujících původ ocelí použitých na výrobu česlí, jak již bylo výše zmíněno, byl proveden chemický rozbor na přístroji Spectrumat GDS 750.

Výsledky chemického složení vzorků jsou uvedeny v tabulkách 5 a 6 na straně 29.

Pro přibližné stanovení jakosti oceli byl použit mobilní jiskrový spektrometr Belec Compact Port HLC. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7 na straně 29.

Tabulka 5 - Chemické složení vzorku 1/2

Chemické složení vzorku 1/2								
Zkušební zařízení: Spectrumat GDS 750								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,04	0,44	0,02	0,018	0,026	0,03	0,03	0,00	0,00
W	Cu	Al	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,00	0,05	0,003	0,00	0,01	0,000	0,02	0,00	0,00

Tabulka 6 - Chemické složení vzorku 2/2

Chemické složení vzorku 2/2								
Zkušební zařízení: Spectrumat GDS 750								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,13	0,34	0,16	0,008	0,053	0,02	0,06	0,01	0,00
W	Cu	Al	Ti	Co	B	Sn	Sb	Nb
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,00	0,15	0,031	0,00	0,01	0,000	0,02	0,00	0,00

Tabulka 7 - Chemické složení vzorku 1/3

Chemické složení vzorku 1/3								
Zkušební zařízení: Belec Compact Port HLC								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,051	0,435	0,006	0,007	0,031	0,056	0,026	< 0,001	< 0,001
W	Cu	Al	Ti	Co	B	Sn	Sn	Nb
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
< 0,001	0,041	< 0,001	0,002	< 0,001	0,0005	0,005	0,005	< 0,001

Podle naměřených hodnot dle tabulky 7 byly na přístroji zobrazeny čtyři možné varianty zařazení oceli:

- Jako nejpravděpodobnější zatřídění dle tabulek je **S235 JR / 1,0037**
- Jako možné zatřídění
 - 1.0055
 - USt 34-1
 - 1,0570
 - S355 J2 G3
 - St 52-3
 - 1,0580
 - E355
 - St 52

2.6 Mechanické vlastnosti materiálů

2.6.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy ČSN EN 6892-1 na vzorku 1/4 a 2/4.

Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9.

Tabulka 8 - Zkouška tahem česlice 1

Zkouška tahem - česlice 1					
Tloušťka	Šířka	Průřez	Délka	Zatížení při mezi kluzu	Maximální zatížení
[mm]	[mm]	[mm²]	[mm]	[kN]	[kN]
5,40	20,0	108,0	60,0	28,6	37,0
			85,7		
Mechanické vlastnosti					
R _{p0,2} (mez kluzu)		R _m (mez pevnosti)		A ₅ (tažnost)	
Z (zúžení)					
[MPa]		[MPa]		[%]	
265		343		42,8	

Tabulka 9 - Zkouška tahem česlice 2

Zkouška tahem - česlice 2					
Tloušťka	Šířka	Průřez	Délka	Zatížení při mezi kluzu	Maximální zatížení
[mm]	[mm]	[mm²]	[mm]	[kN]	[kN]
5,35	20,0	107,0	60,0	28,1	42,3
			80,8		
Mechanické vlastnosti					
Rp0,2 (mez kluzu)		Rm (mez pevnosti)		A5 (tažnost)	
Z (zúžení)					
[MPa]		[MPa]		[%]	
263		395		34,7	

Na základě výše uvedených výsledků tahových zkoušek je více než pravděpodobné, že tyto vzorky byly použity z různých taveb ocelí, nebo dokonce mohly být použité při výstavbě i rozdílné jakosti ocelí.

2.6.2 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14556 (420380) u česlice 1 a 2 z důvodu kontroly shodnosti použitých ocelí. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 10 a 11. Teplota zkoušení byla stanovena na -20 °C a vzorky byly odebrány ve směru podélném a kolmém na pásovnici. Protože i tato část česlí mohla být vyrobena různými způsoby, lze se pouze domnívat, že vyšší hodnoty nárazové práce jsou ve směru podélném ke směru válcování.

Tabulka 10 - Zkouška rázem v ohybu u česlice 1 [17]

Zkoušky rázem v ohybu – česlice 1			
Směr vláken	Typ tyče	Zkušební teplota	Nárazová práce
[-]	[-]	[°C]	[J]
1	KV ₂ 10x5	-20	8 / 5 / 5
2	KV ₂ 10x5	-20	4 / 4 / 4

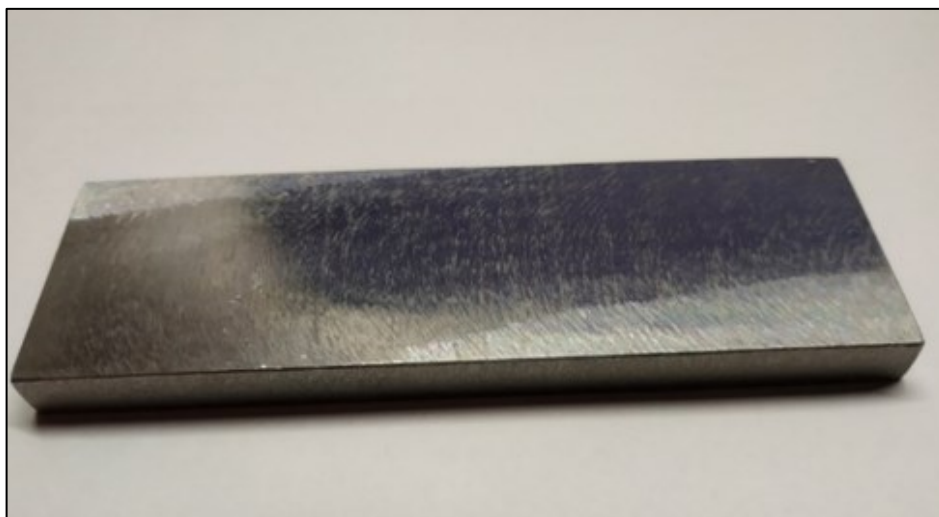
Tabulka 11 - Zkouška rázem v ohybu u česlice 2 [17]

Zkoušky rázem v ohybu – česlice 2			
Směr vláken	Typ tyče	Zkušební teplota	Nárazová práce
[-]	[-]	[°C]	[J]
1	KV ₂ 10x5	-20	18 / 26 / 24
2	KV ₂ 10x5	-20	19 / 22 / 20

Na základě výše uvedených výsledků mechanického zkoušení je více než pravděpodobné, že jednotlivé pásoviny byly použity z různých taveb ocelí, nebo dokonce mohly být použité při výstavbě i rozdílné jakosti ocelí.

2.7 Stanovení hustoty oceli

Pro stanovení hustoty vzorku oceli použité na česlích bylo provedeno odstranění horní zkorodované vrstvy. Takto vytvořený kvádr (viz obr. 10) byl zvážen a změřen digitálním inspekčním měřidlem. Na základě objemu a hmotnosti byla stanovena hustota tělesa v níže uvedené tabulce 12.



Obrázek 10 - Vybroušený vzorek 1/3 (ZM)
vlastní zdroj

Tabulka 12 - Rozměry, hmotnost a hustota vzorku 1/3

Vzorek 1/3 bez koroze				
Rozměr a objem etalonu vyrobeného z původního materiálu	Délka	Šířka	Výška	Objem
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ³]
	34,9620	115,3080	7,1395	28559,893
Hustota tabulková / Hmotnost vzorku	ρ_{oceli} tabulky	7,895 g/cm ³	Hmotnost g	224,63
Hustota vzorku 1/3	$\rho_v = \frac{m}{V} = \frac{224,63}{28,559893}$		7,865 g/cm³.	

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

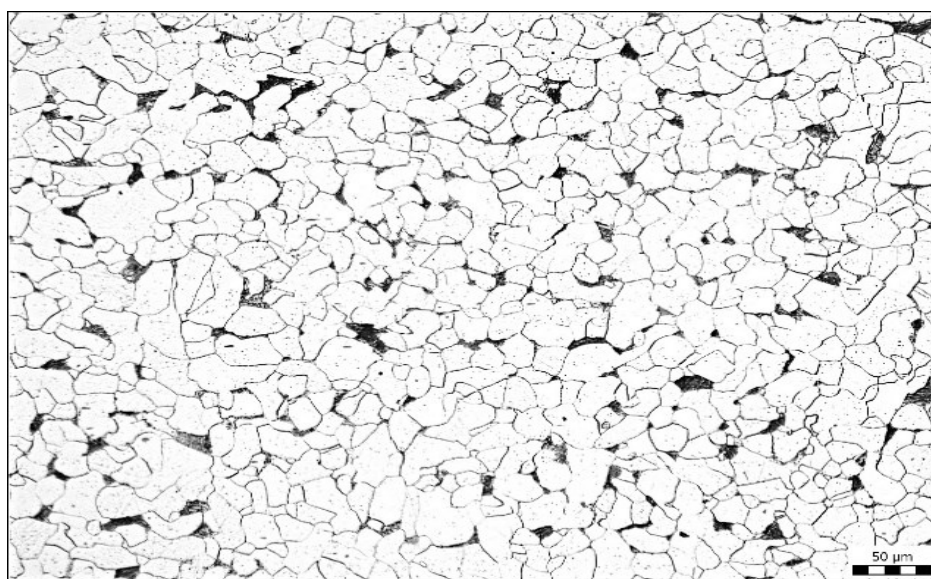
Kde ρ_v je hustota vzorku

Výsledná hustota měřeného vzorku dle výpočtu (3) byla stanovena na základě hmotnosti a objemu na **7,865 g/cm³**.

2.8 Metalografické hodnocení

2.8.1 Mikrostruktura původního základního materiálu

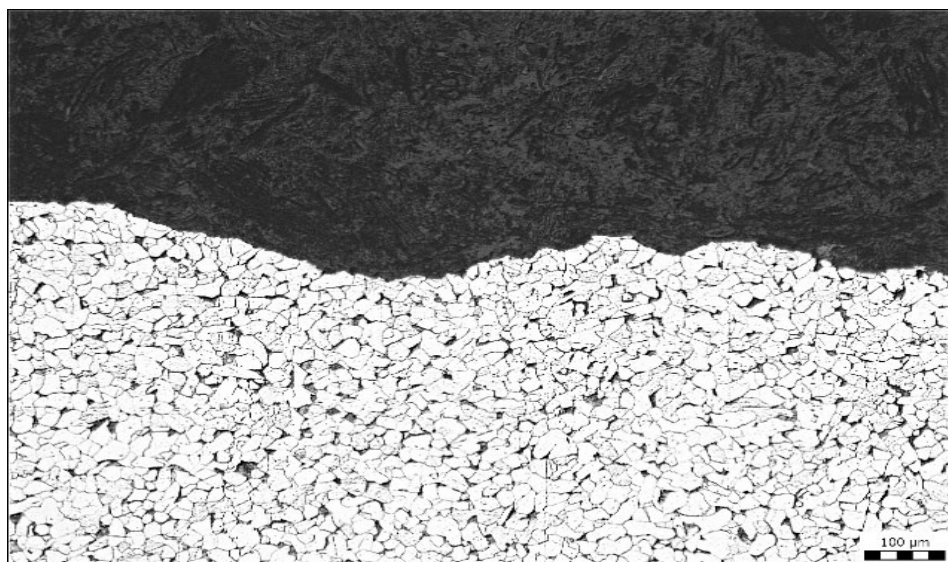
Feriticko–perlitická mikrostruktura základního materiálu je zřejmá z obr. 11 a odpovídá tomu, že materiál byl normalizačně žíhaný. Detail této mikrostruktury zobrazuje obr. 12, na kterém lze zřetelně pozorovat lamelární perlit. Na povrchu základního materiálu se projevila degradace materiálu korozí (viz obr. 13 na str.34) a lze sledovat další vady např. kavity na obr. 14 na str.34 s patrnou výplní rzi nebo vznik zárodků důlkové koroze.



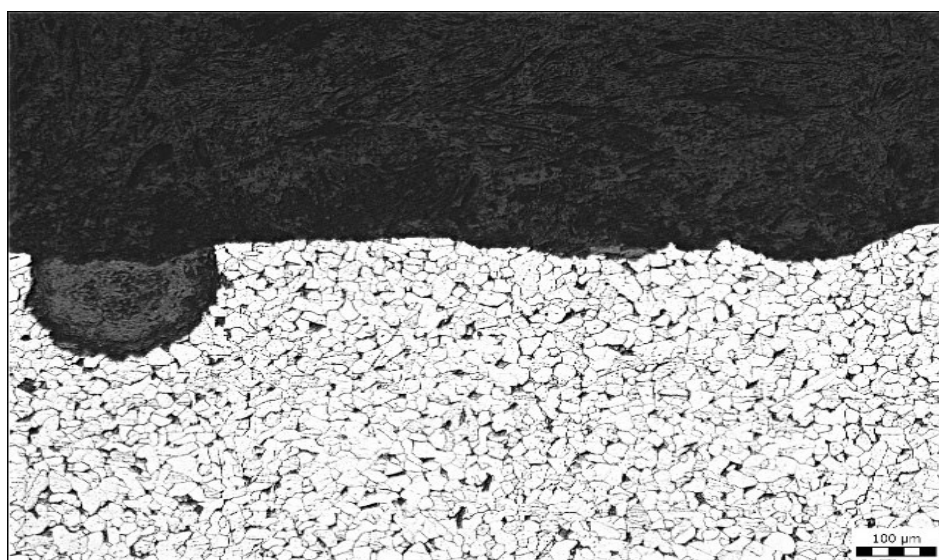
Obrázek 11 - Mikrostruktura základního materiálu
vlastní zdroj



Obrázek 12 - Mikrostruktura základního materiálu – detail
vlastní zdroj



Obrázek 13 - Základní materiál
vlastní zdroj



Obrázek 14 - Kavita se rží
vlastní zdroj

2.9 Určení jakosti základního materiálu

Z výše uvedených výsledků zkoušení chemického složení, mechanických vlastností a kontroly mikrostruktury byla stanovena nejpravděpodobnější jakost oceli.

Na základě výsledků chemického složení se jedná o nízkouhlíkovou podeutektoidní ocel ve třídě oceli 11, v rozmezí S235JR (11 373) – S355J0 (11 523).

Vzhledem k absenci Si a Al u vzorku 1/2 a naopak přítomnosti u vzorku 2/2 lze konstatovat, že oceli byly dodávány v různých stavech (neuklidněná a poloukudněná).

Tabulka 13 - Druhy ocelí a jejich značení [8]

Označení oceli		
ČSN	DIN	EN
11 373	1.0036	S235JR
Neuklidněná, zaručená svařitelnost		
11 375	1.0038	S235JR
Uklidněná, stejnoměrnější složení, zaručená tavná svařitelnost		
11378	1,0116	S235J0
Jakostní, jemnozrnná, konstrukční, zaručená svařitelnost		
11 523	1.0553	S355J0
Uklidněná, zaručená tavná svařitelnost		

Jako nejpravděpodobnější základní materiál se dle tabulky 13 jeví ocel S235 JR nebo 1.0036 (11 373), která je určena pro konstrukce a vyráběla se jako neuklidněná.

Druhý nejpravděpodobnější materiál je S235 JR / 1.0038 (11 375) určený právě pro vodní díla, vtokové objekty vodních turbín, spirální skříně vodních turbín, vrata plavidlových komor, klapky uzávěrů, svařované kulové uzávěry, spojky a podvozky vagónů.

2.10 Metalografické šetření u návaru

Součástí ověření bylo vytvoření návaru na původním základním materiálu, jak již bylo výše zmíněno.

Pro nejednoznačné zařazení, zda jde o dělený plech či pásovou ocel, bylo přistoupeno k doplňkové kontrole třídy oceli na základě jednotlivých prvků dle chemického složení ocelí normovaných v ČSR a v cizině.

Postup zhotovení návaru byl volen tak, aby byl co nejvíce podobný reálným podmínkám, při kterých lze opravy provádět. Pro návar byl použitý zdroj dle tabulky 14 a elektrody s chemickým složením uvedené v tabulce 15 na str.33.

Výsledkem je ověření svařitelnosti původního materiálu vystaveného dlouhodobě zvýšenému tlaku ve vodním prostředí se svarovým kovem obalovaných elektrod speciálně navržených pro hyperbarické svařování za mokra [20].

Tabulka 14 - Parametry svařovacího zdroje [22]

Parametry svařovacího zdroje VTU307		
Síťové napětí při 50/60 Hz	3 x 400 V	
Jištění	3 x 20 A	
Rozsah	Plynulý od 5–300 A	
Napětí na prázdko	75 V stejnosměrné	
Rozsah pracovního napětí	20–32 V	
Svařovací proud při zatížení	35 %	300 A
	60 %	230 A
	100 %	180 A
Metoda svařování	MMA	

Tabulka 15 - Chemické složení a parametry přídatného materiálu [18]

Chemické složení elektrod Soft Touch BROCO				
C	Mn	Si	P	S
[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]	[hm%]
0,05	0,30	0,01	0,009	0,010
Parametry elektrod				
Označení	Průměr	Typ elektrody	Proud	Napětí
--	[inch. / mm]	--	[A]	[V]
UW-CS-1	1/8 / 3,2	Mild steel	160-170	30

Tabulka 16 - Parametry návaru

Parametry návaru		
Použité elektrody	UW-CS-1	
Operační hloubka/ viditelnost	5 m / 0,5m	
Teplota vody	6,4 °C	
Poloha při návaru	PA	
Polarita elektrody	DC -	
Vzorek 2/2	Návar 1	Návar 2
Proudové nastavení	160 A	180 A
Rychlost návaru	150 mm / min	150 mm / min

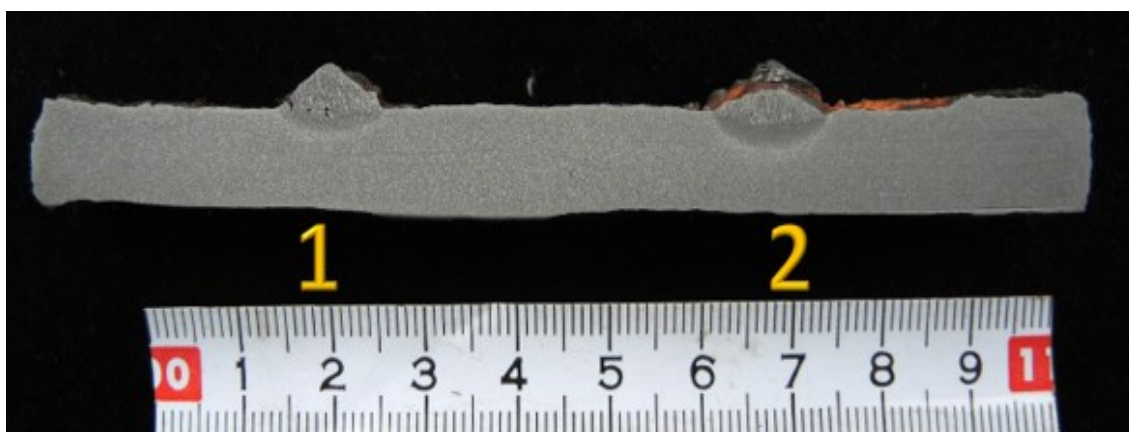
Při chemickém složení ZM, přídavného materiálu a svařovacích parametrech dle tabulky 16 se dostaneme pod hranici přípustného 50 % obsahu martenzitu ve svaru.

Tvrdost svarového kovu ve skutečnosti vychází vyšší, než udává simulace na stránkách Welding Technology Information center. Tato odchylka je způsobena rychlejším ochlazením svarového kovu [23].

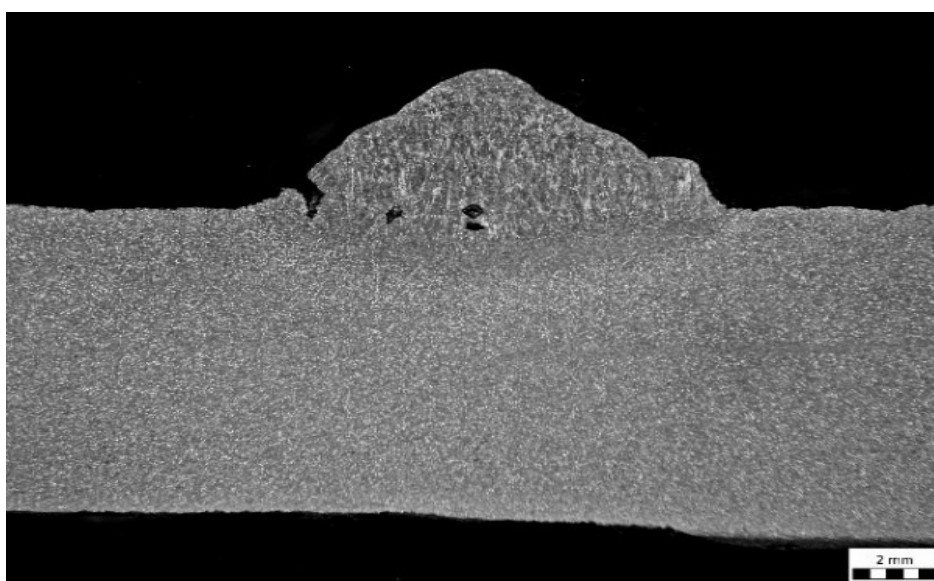
Základní materiál česlí je na obr. 15 s patrnou důlkovou a bodovou korozí po celém obvodu vzorku.

V návaru č. 1 (obr. 16), ve svarovém kovu, jsou viditelné dutiny částečně vyplněné struskou. Převýšení návaru a téměř nepatrná TOO naznačuje, že návar neměl dobře nastavený příkon energie a dle ČSN EN ISO 6520-1 nesplňuje tedy požadavky normy [19].

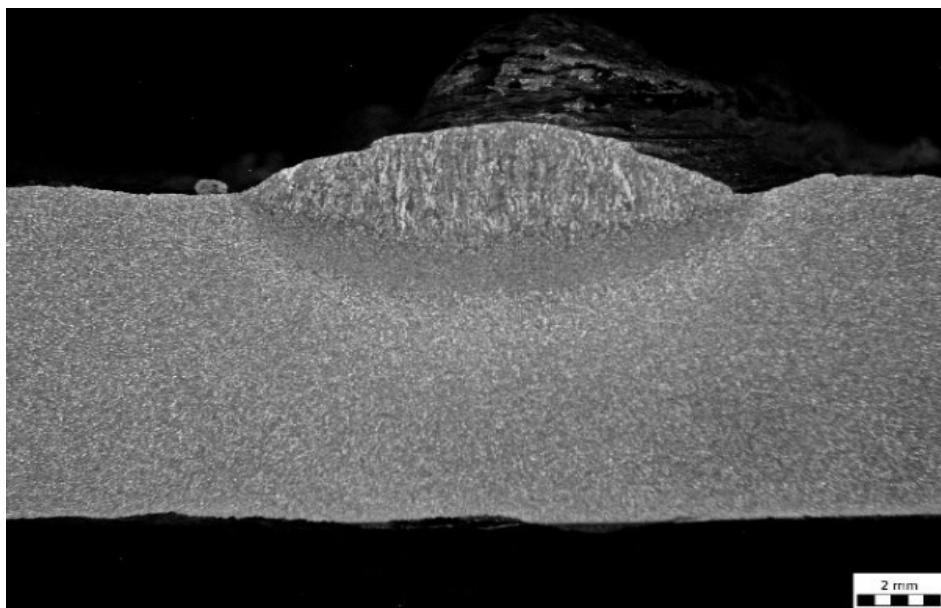
Návar č. 2 (obr. 17 na straně 38) je provedený s vyšší proudovou hodnotou. Zde je dobře viditelná TOO a svarový kov bez zjevných dutin se struskou ve svarovém kovu.



Obrázek 15 - Makrostruktura vzorku 1/3 základního materiálu *vlastní zdroj*



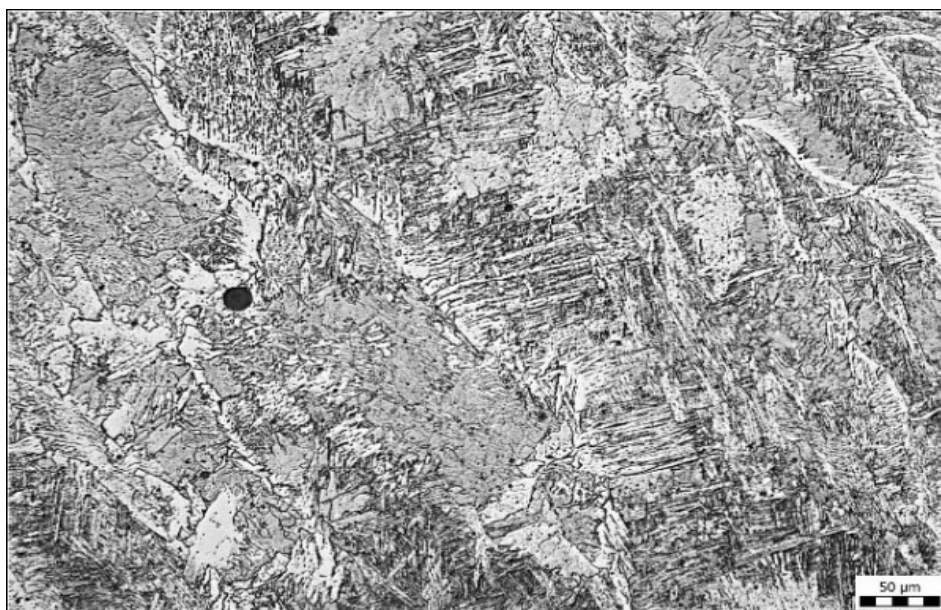
Obrázek 16 - Návar č.1
vlastní zdroj



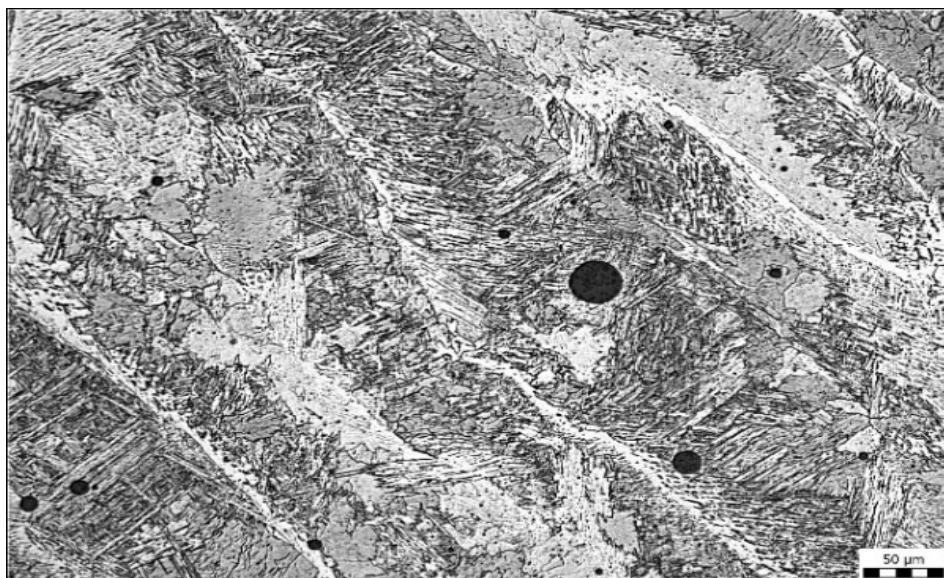
Obrázek 17 - Návar č2
vlastní zdroj

Na obr 18 a 19 na str 39 je mikrostruktura svarového kovu s licí dolní bainitickou strukturou s náznakem feritického síťoví. Uvnitř svarového kovu se nacházejí černé kulovité silikátové vměstky pocházející z obalu svařovací elektrody.

Na obr. 20 na str 39 je patrná hranice ztavení ve střední části mezi svarovým kovem s dolní světlou bainitickou strukturou v levé části a zhrublým zrnem v tmavé oblasti základního materiálu přehřáté oblasti v pravé části.



Obrázek 18 - Mikrostruktura svarového kovu
vlastní zdroj



Obrázek 19 - Mikrostruktura svarového kovu
vlastní zdroj



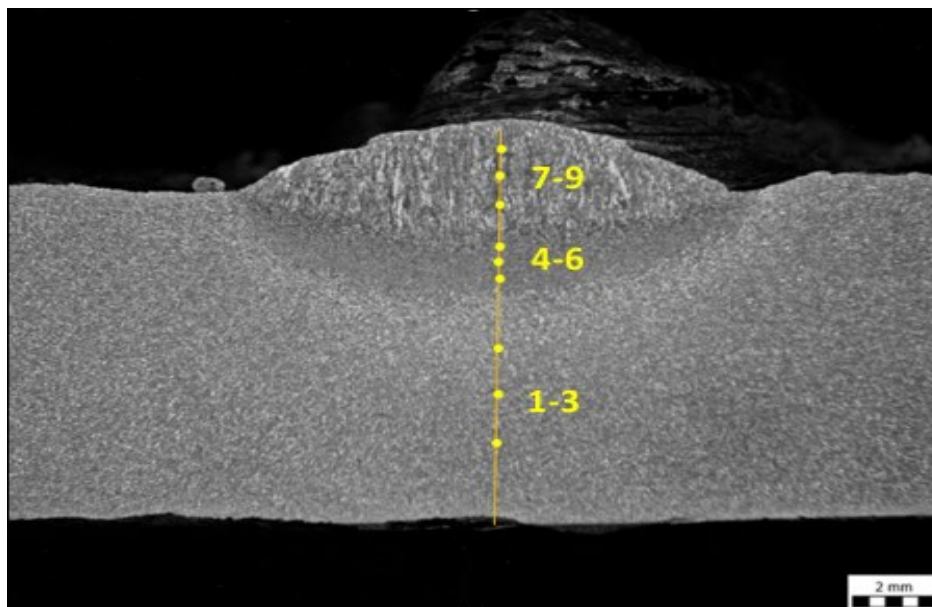
Obrázek 20 - Hranice ztavení mezi svarovým kovem a ZM
vlastní zdroj

2.11 Zkouška tvrdosti návaru

Na obr. 21 str 40 jsou vyznačená přibližná místa vtisků při zkoušce tvrdosti dle Vickerse HV10 ČSN EN ISO 6507-1(420374). [20].

Zkoušky tvrdosti byly provedeny na tvrdoměru HPO 250. Jednotlivé vtisky v místě svarového kovu, TOO a základního materiálu jsou zapsané v tabulce 17 na str. 40. Tyto vtisky byly provedeny v oblastech ZM, TOO a svarového kovu.

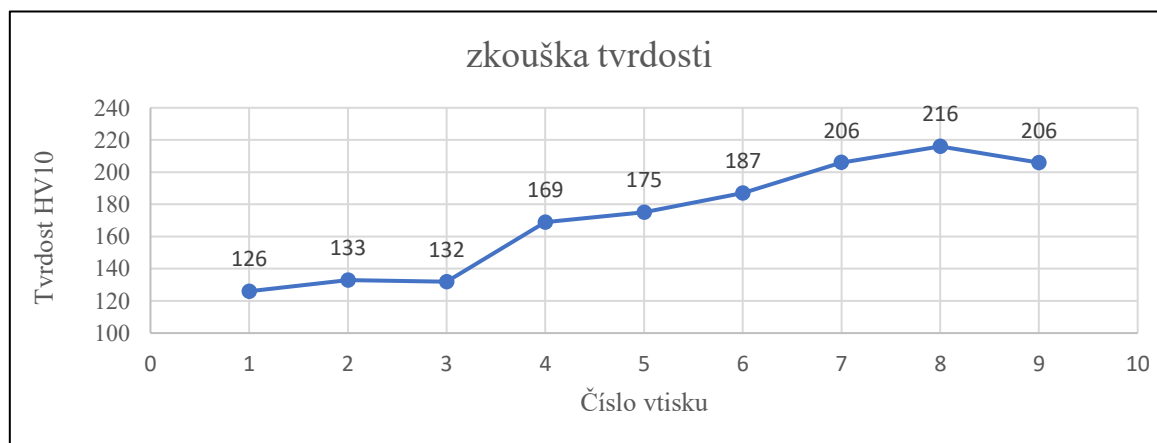
V oblasti TOO a svarového kovu je tvrdost zvýšená v důsledku změny struktury a rychlého ochlazení materiálu způsobeného tepelným odvodem.



Obrázek 21 - Oblast vtisku
vlastní zdroj

Tabulka 17 - Tvrdosti v jednotlivých oblastech návaru vzorku 2/3 a

Oblast	Číslo vtisku	Naměřená hodnota [HV10]	
		Vzorek 2/3	Vzorek 2/3
Základní materiál (ZM)	1	126	131
	2	133	133
	3	132	131
Tepelně ovlivněná zóna (TOO)	4	169	--
	5	175	--
	6	187	--
Svarový kov (SV)	7	206	--
	8	216	--
	9	206	--



Graf 3 - Zkouška tvrdosti

Při těchto parametrech ZM a přídavného materiálu elektrod se dostaneme pod hranici přípustného 50 % obsahu martenzitu ve svaru s tvrdostí svarového kovu kolem 230 HV viz graf 3 str. 40 [15].

2.12 Metalografické hodnocení návaru

Z šetření vyplývá, že podeutektoidní původní neuklidněné oceli s dlouhou expoziční dobou ve vodním prostředí lze použít pro nezbytnou opravu s nynějšími nízkouhlíkovými elektrodami. A to jak v poloze PA, tak ve všech dalších s malými úpravami svařovacího proudu dle návodu.

Maximální tvrdost návaru 216 (HV10) a TOO 187 (HV10) vyhovuje podmínce maximální tvrdosti 350 HV s 50 % martenzitem v návaru [15].

Jako nezbytnou podmínku je ale nutné dodržet vysokou čistotu svaru a jeho okolí s předepsanou proudovou hodnotou tak, aby svar byl dostatečně provařený a neobsahoval nežádoucí vměstky z nedostatečného očištění.

2.13 Mikrostruktura svařovaného základního materiálu

Tento vzorek s koutovým svarem (viz obrázek 22 na str.42) byl pořízen na pravidelném kurzu a následném přezkušování potápěčů–svářečů.

Pracovník svařil základní materiál, v našem případě koutovým svarem, elektrodou s chemickým složením, které bylo podobné základnímu materiálu (ČSN EN ISO 15618-1) [21].

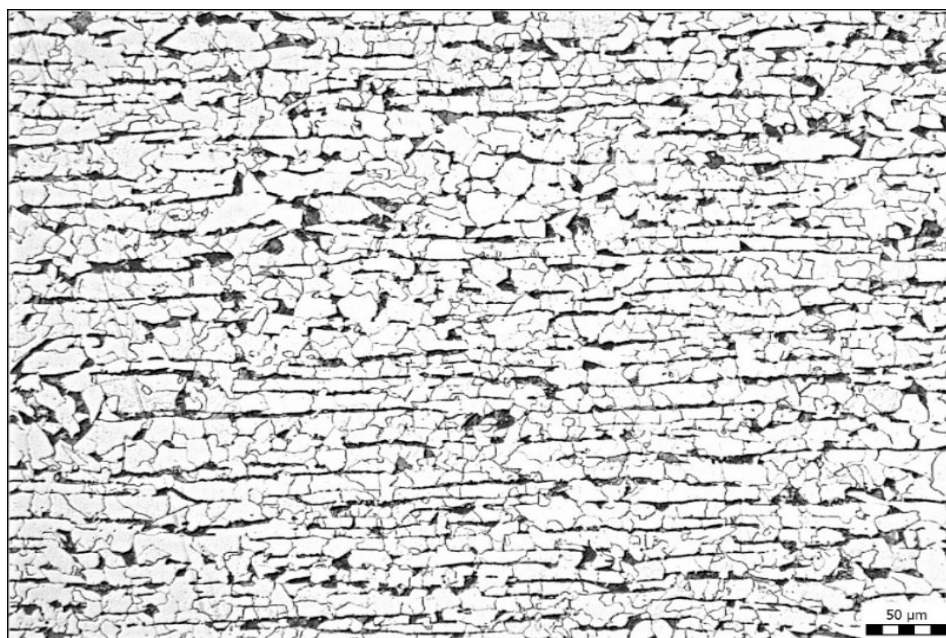
Následně byl svarový spoj vizuálně zkontrolován dle ČSN EN ISO 17637 a to hned po svaření. V případě potřeby lze vizuální kontrolu doplnit o nedestruktivní zkoušku kapilární EN 571-1, nebo magnetickou práškovou dle ČSN EN ISO 17638 Tyto zkoušky dělány nebyly

Plech podložky a stojiny základního materiálu pro zkušební koutový svar je stejný, nebo podobný tomu, s jakým potápěč–svářeč běžně pracuje.

Na obr. 23 na str.42 je feriticko-perlitická struktura s částečnou řádkovitostí způsobenou válcováním za tepla odpovídající jakosti S235JR nebo 1.0036 (11 373).



Obrázek 22 - Zkušební koutový svar
vlastní zdroj



Obrázek 23 - Základní materiál podložky a stojiny
vlastní zdroj

2.14 Metalografické šetření koutového svaru

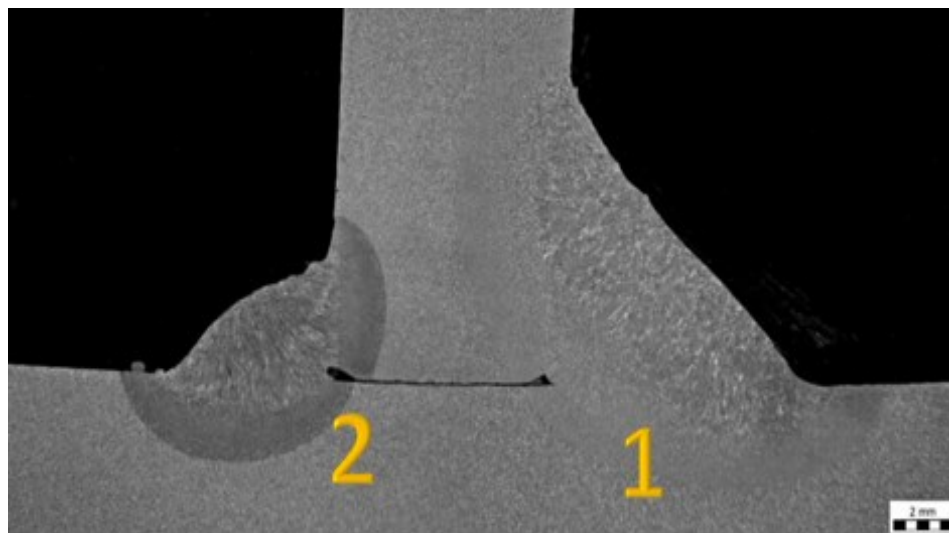
Zkušební vzorek byl nadělen pásovou pilou na vzorky pro zobrazení makrostruktury dle ČSN EN ISO 17639 a zkoušku rozlomením viz ČSN EN ISO 9017.

Makroskopický řez zkušebním vzorkem na je obrázku 24 str. 43 tvořený dvěma svary.

Pravý svar 1 na obr. 24 se skládá ze dvou vrstev. Dolní vrstvy s neprovařeným kořenem tvořené jemnější strukturou a z horní vrstvy svaru, která je široce rozlévaná do stran

s hrubější dendritickou strukturou kovu. Pro tento svar byla použita nízkouhlíková elektroda BROCO Underwater Easy touch electrodes.

Levý svar 2 na obr. 24 je s neprovařeným kořenem způsobený expandující párou. Tento svar je tvořený pouze jednou vrstvou s elektrodou určenou na nerezové materiály BROCO Soft Touch electrodes. Barevný rozdíl TOO je způsobený jiným chemickým složením elektrody.



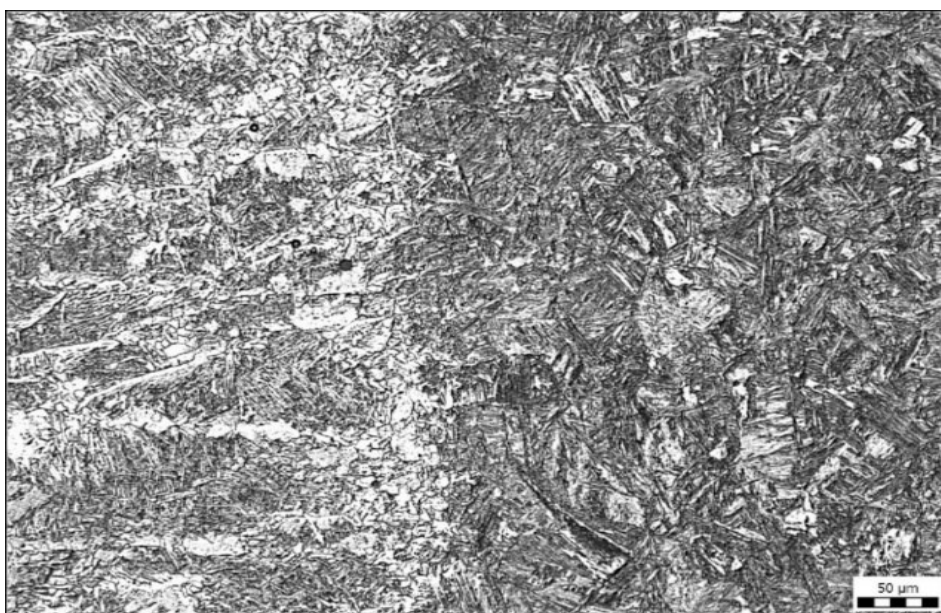
Obrázek 24 - Makrostruktura koutových svarů
vlastní zdroj

Horní svarový kov (obr. 25 strana 44) má perliticko-bainitickou strukturu s feritickým síťovím. Dolní bainit je tvořený jehlicovitou strukturou cementitu a ojedinělými zrny feritu způsobenou rychlým ochlazením svaru. V dolní části obrázku je patrný silikátový vměstek z obalu elektrody

Na obr. 26 na straně 44 je ve střední části hranice ztavení mezi svarovým kovem a základním materiálem. V levé části je svarový kov horního svaru tvořen nesouvislým feritickým síťovím. V pravé části je základní materiál v oblasti TOO, kde zhrublé zrno tvořící směs popuštěných základních složek.



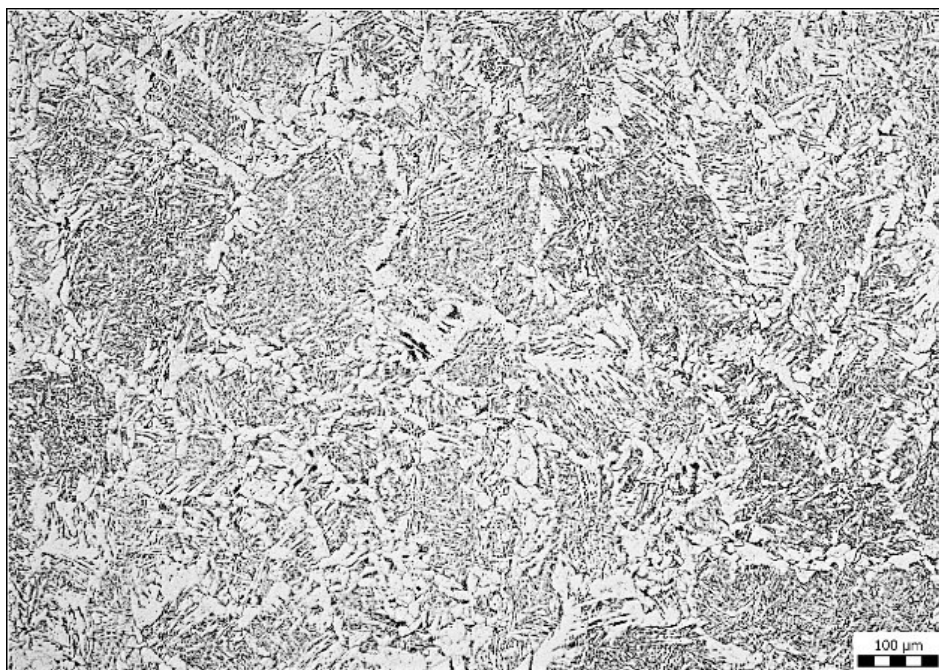
Obrázek 25 - Svarový kov perliticko-bainitické struktury
vlastní zdroj



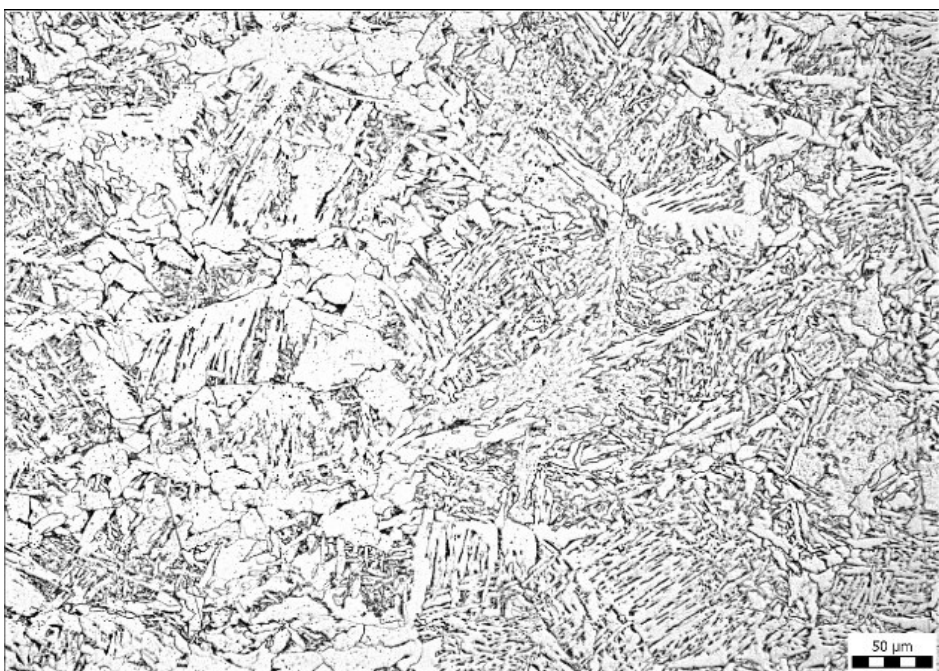
Obrázek 26 - Hranice ztavení
vlastní zdroj

Svarový kov dolní housenky je na obr. 27 str. 45 tvořený jemnou bainitickou strukturou feritu a cementitu s ojedinělým výskytem perlitu ve struktuře.

Bainitická struktury s feritem a cementitem na obr. 28 str.45 prošla vlivem provedení horního svaru částečnou strukturní martenzitickou přeměnou.



Obrázek 27 - Struktura dolní housenky
vlastní zdroj



Obrázek 28 - Detail struktury
vlastní zdroj

2.15 Metalografické hodnocení koutového svaru

Z šetření vyplývá, že svařitelnost nových základních materiálů je vyhovující jen při použití materiálů a pracovních postupů dle zpracované projektové dokumentace a dodržení technologie při svařování.

Z obr. 27 a 28 je patrné, že při kladení více vrstev dochází ke změně struktury svarového kovu pod horní vrstvou. Tyto změny vedou ke zvýšení tvrdosti v TOO a k nepříznivému vnitřnímu napětí.

Toto napětí může být zdrojem mikrotrhlin mezi jednotlivými kladenými svary nebo v TOO.

Potápěč–svářeč musí dbát na precizní provedení svarového spoje a musí daný materiál dobře znát.

Pokud se během schváleného pracovního postupu objeví překážky bránící ve stanovené technologii, je nutné přerušit práci a konzultovat změny pracovního postupu nebo materiálu s projektantem. Pracovní činnost včetně změn je nutné zapisovat do stavebního deníku.

3 VYHODNOCENÍ VLIVU ZMĚNY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ A MIKROSTRUKTURY

Z provedených šetření vyplívá, že základní materiál je možné svařovat, avšak je nutné velice striktně dodržet určité technologické postupy.

Pro svaření daného materiálu se musí použít přídavný materiál s takovým složením, aby výsledný svar splňoval podobné parametry, jako materiál základní. Pokud jde o ušlechtilé materiály, musí být použit přídavný materiál, který svým chemickým složením i po zředění se základním materiálem splňuje stejné nebo lepší parametry.

Kvůli eliminaci trhlin je třeba se vyhnout velkému pnutí, nedostatečně provařenému kořeni, výskytu vměstků a zvýšenému nasycení svarového kovu vodíkem. Proto je nutné důkladně očistit základní materiál od rzi a nečistot, které jsou pod vodou přítomny v těsné blízkosti dna. Klíčové k provedení svaru bez vměstků a neprovařeného kořene je očištění tlakovou vodou a následná úprava svarové plochy. Velkou pozornost je třeba věnovat poloze elektrody vůči svaru, rychlosti svařování a vzdálenosti elektrody od základního materiálu, jelikož plyn uvolněný z obalu elektrody dokáže pokrýt jen těsné okolí svaru. V případě větší vzdálenosti elektrody od základního materiálu nedojde k dokonalému provaření kořene. V takovém případě jsou v kořenové oblasti viditelné neprovařené úseky, nebo úseky s kavitami v ose svaru přecházející do oblasti svarového kovu v blízkosti stojiny. V případě kladení více svarových vrstev je nutné počítat s trhlínami způsobené velkým vnitřním pnutím.

Závěrem lze říci, že za dodržení výše uvedených technologických postupů svařování je možné opravovat komponenty vodních děl podvodním svařováním speciální obalenou elektrodou.

Bibliografie

- [1]. Ohře, Povodí. Vodní dílo Jesenice. Povodí Ohře. [Online] 6. Únor 2019. [Citace: 10. Duben 2020.] <http://www.poh.cz/vodni-dilo-jesenice/d-2612><http://www.poh.cz/vodni-dilo-jesenice/d-2612>.
- [2]. Mapy.cz. Mapy.cz. [Online] Seznam, 22. Duben 2020. <https://mapy.cz/zemepisna?x=12.4467773&y=50.0658001&z=13>.
- [3]. Ohře, Povodí. Vodohospodářská laboratoř. Povodí Ohře laboratoř. [Online] [Citace: 21. Leden 2020.] <http://www.poh.cz/vodohospodarske-laboratore/ms-1440/p1=1440>.
- [4]. Broža, Vojtěch. Přehrady Čech, Morav a Slezska. Liberec : Knhy 555, 2005. 80-8666-11-7.
- [5]. BÜSCH. Česle. BÜSCH. [Online] [Citace: 16. Březen 2020.] <https://www.buesch.com/cs/vyroby/vretenova-soupatka-hraditka-a-stavitka/prislusenstvi/cesle/>.
- [6]. energetika, MVE. Česle. mve energetika. [Online] [Citace: 5. Květen 2020.] <http://mve.energetika.cz/vodnidilo/cesle.htm>.
- [7]. Dubský, Ing. Ota. Úprava česlí vtoku do spodních výpustí. Technická zpráva. Praha : autor neznámý, 2017.
- [8]. Feromat. Jakosti oceli. Feromat. [Online] 2010. [Citace: 17. Prosinec 2019.] http://www.feromat.cz/jakosti_oceli.
- [9]. norma, Česká technická. ČSN 41 1343 (411343). Praha : Česká technická norma, 1992. 33770.
- [10]. norma, Česká technická. Ocel 11 353 (411353). Praha : Česká technická norma, 1984. 411353.
- [11]. —. Ocel 11 373. Praha : Česká technická norma, 1994. 411373.
- [12]. —. Ocel 11 375. Praha : Česká technická norma, 1994. 411375.
- [13]. —. Ocel 11 378. Praha : Česká technická norma, 1994. 411378.
- [14]. —. Korozivzdorné oceli - část I: Přehled korozivzdorných ocelí. Praha : Česká technická norma, 2015. 420927.
- [15]. Koukal, Jaroslav a Zmydlený, Tomáš. Svařování I. Ostrava : VŠB Technická univerzita Ostrava, 2005. 978-80248-0870-3.
- [16]. Švanda, Pavel. Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí. Švanda. [Online] [Citace: 20. Leden 2020.] <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>.

- [17]. norma, Česká technická. Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda. Praha : Česká technická norma, 2017. 420381.
- [18]. rankin, Broco. Underwater Cutting and Welding Setting the World Standard for Underwater Excellence Since 1975. Broco rankin. [Online] 2020. [Citace: 26. Leden 2020.] <https://www.broco-rankin.com/underwater1/>.
- [19]. norma, Česká technická. Svařování a příbuzné procesy - klasifikace geometrických vad koových materiálů - část I: Tavné svařování. Praha : Česká technická norma, 2008. 050005.
- [20]. —. Kovové materiály - zkouška tvrdosti podle Vickerse. Praha : Česká technická norma, 2018. 420374.
- [21]. —. ČSN EN ISO 15618-1. Praha : Česká technická norma, 2019. 501608.
- [22].- *FRONIUS VTU 307* [online]. Osek [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.froweld.cz/svarovaci-technika/eshop/2-1-SVAROVACI-ZDROJE/50-2-Fronius/5/1439-WTU-307>
- [23] - *JWES: Welding Technology Information Center* [online]. Osek, 2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/cal3.jsp